

PDF hosted at the Radboud Repository of the Radboud University Nijmegen

The following full text is a publisher's version.

For additional information about this publication click this link.

<http://hdl.handle.net/2066/174585>

Please be advised that this information was generated on 2017-12-05 and may be subject to change.

Zonnecelrendementen in perspectief

Een zonnecel zet lichtenergie rechtstreeks om in elektrische energie. Van alle vormen van duurzame energie hebben zonnecellen de grootste potentie om blijvend te voldoen aan de wereldwijde energiebehoefte. Echter, in West- en Midden-Europa zijn de kosten voor elektriciteit met de huidige generatie zonnepanelen 0,50 à 0,60 €/kWh zodat zonnestroom nog niet kan concurreren met de gangbare elektriciteitsprijs van circa 0,20 €/kWh. Om het enorme potentieel aan zonne-energie te kunnen oogsten, moet het rendement van de cellen omhoog en hun productiekosten omlaag.

John Schermer

Halfgeleiders en zonnecellen

Een halfgeleiderkristal heeft een stabiele structuur waarbij alle elektronen sterk aan hun plaats gebonden zijn. Er is voldoende energie nodig om een elektron uit deze vaste positie los te slaan zodat deze vrij door het kristalrooster kan bewegen. Hiertoe dient een, voor elk halfgeleidermateriaal specifieke, energiebarrière (de bandafstand) te worden overbrugd. Op de oorspronkelijke positie van het elektron blijft een gat met een positieve ruimtelading achter. Deze positie kan eenvoudig worden ingenomen door een naburig elektron. Dit laatste proces herhaalt zich zodat ook het posi-

tief geladen gat zich als het ware vrij door het kristal beweegt.

Om geleidbaarheid van een halfgeleider te vergroten wordt het gedoteerd. Hierbij wordt een beperkt deel van de oorspronkelijke atomen vervangen door atomen met een valentie-elektron meer (n-type halfgeleider) of minder (p-type halfgeleider) in de buitenschil. Een zonnecel bestaat uit een laag halfgeleidermateriaal waarin een p-n overgang (p-n junctie) is aangebracht door de ene kant n-type en de andere kant p-type te doteren (zie figuur 1). Bij het doteren wordt typisch minder dan één op de miljoen atomen vervangen. Het halfgeleidermateriaal zelf moet dus zeer zuiver zijn om goed gecontroleerd te kunnen doteren. Door de hiervoor benodigde zuiveringsprocessen zijn halfgeleiders relatief kostbare materialen. Daarom is het streven naar een minimaal gebruik van halfgeleidermateriaal om een hoeveelheid elektriciteit te genereren een belangrijk gegeven bij de productie van zonnecellen.

Rendement

Het rendement van een zonnecel is de verhouding tussen de gegenereerde elektrische energie en

de op het celoppervlak ingestraalde lichtenergie. Wereldwijd wordt er veel onderzoek verricht naar het behalen van het maximale rendement voor verschillende typen zonnecellen. Het onderzoek richt zich niet alleen op materialen met de hoogste rendementen omdat bepaalde materialen met lage rendementen potentieel veel goedkoper te produceren zijn. Op deze wijze heeft elk materiaalsysteem zijn eigen recordrendement. Regelmatig duiken er in publicaties recordclaims op voor cellen waarvan het rendement op een onduidelijke wijze is bepaald of waarbij een afwijkende definitie van het rendement wordt gehanteerd. Om dit te ondervangen bestaat er een geautoriseerde lijst met recordrendementen; de 'Solar Cell Efficiency Tables'. Deze rendementtabellen worden sinds 1993 eens per half jaar bijgewerkt en gepubliceerd in 'Progress in Photovoltaics: Research and Applications', een vaktijdschrift voor zonnecelonderzoekers [1]. Alle rendementrecords in deze tabellen zijn op een eenduidige wijze gemeten aan een van de zes internationaal erkende zonnecel testcentra in de wereld. De metingen vinden plaats onder zogenaamde standaard testcondities (STC), dat wil zeggen onder de gestandaardiseerde Air-Mass 1.5

John Schermer studeerde Natuurkunde aan de Technische Universiteit Eindhoven en specialiseerde zich in de stromingsleer en halfgeleiderfysica. In 1991 startte hij zijn promotieonderzoek naar de depositie van synthetisch diamant vanuit de gasfase aan de Radboud Universiteit Nijmegen. Sinds 1996 leidt hij op de afdeling Applied Materials Science van deze universiteit het onderzoek naar hoogrendement III-V zonnecellen.



J.Schermer@science.ru.nl

spectrale verdeling van het licht met een totale intensiteit van 1000 W/m^2 en bij een temperatuur van 25°C . Figuur 2 toont voor verschillende materialen de toename van het rendement in de loop van de tijd.

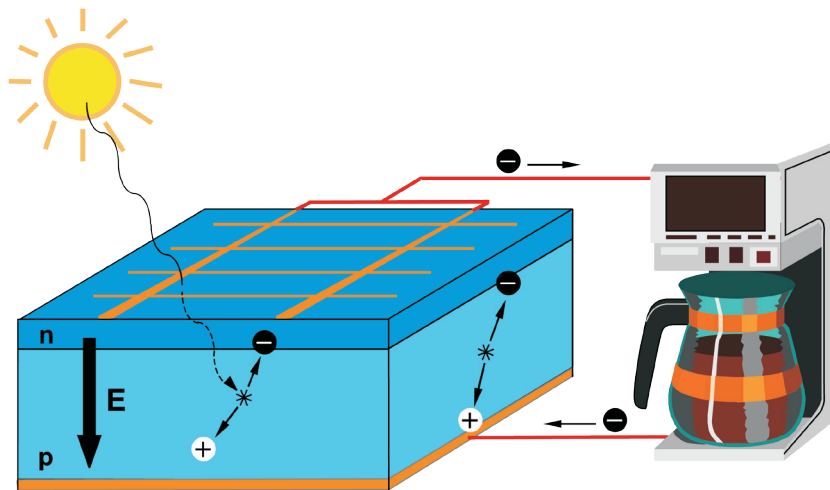
Van lab naar industrie

In het laboratorium bereikte rendementrecords geven aan wat experimenteel haalbaar is met een bepaald materiaalsysteem. Het is vervolgens aan de industrie om de meest veelbelovende ontwikkelingen om te zetten naar een betaalbaar zonnepaneel. Behalve het haalbare rendement spelen hierbij natuurlijk de kosten voor de verschillende materialen en de beschikbare productieprocessen een doorslaggevende rol. Bij de omzetting naar productie worden de meest kostbare processtappen weggelaten of vervangen door een goedkoper alternatief. Als gevolg hiervan zijn door de industrie geproduceerde zonnecellen veel goedkoper dan de overeenkomstige laboratoriumcellen maar hebben ook een lager rendement omdat uit kostenoverwegingen niet het maximale uit het materiaal wordt gehaald.

Kristallijn silicium cellen

De bandafstand van kristallijn silicium (c-Si) past behoorlijk goed op het door de zon ingestraalde energiespectrum. Dit betekent dat met c-Si cellen hoge rendementen worden behaald. Het hoogste rendement van $25,0\%$ is in 1999 bereikt met monokristallijn silicium (mono-Si) aan de University of New South Wales (UNSW) in Australië (zie figuur 2). In productie worden er met zonnepanelen op basis van mono-Si rendementen van $16\text{--}18\%$ behaald. Uit kostenoverweging wordt overigens vaak multikristallijn (multi-Si) gebruikt dat bestaat uit meerdere met elkaar versmolten silicium kristallen. In productie halen multi-Si panelen typisch rendementen van $14\text{--}16\%$.

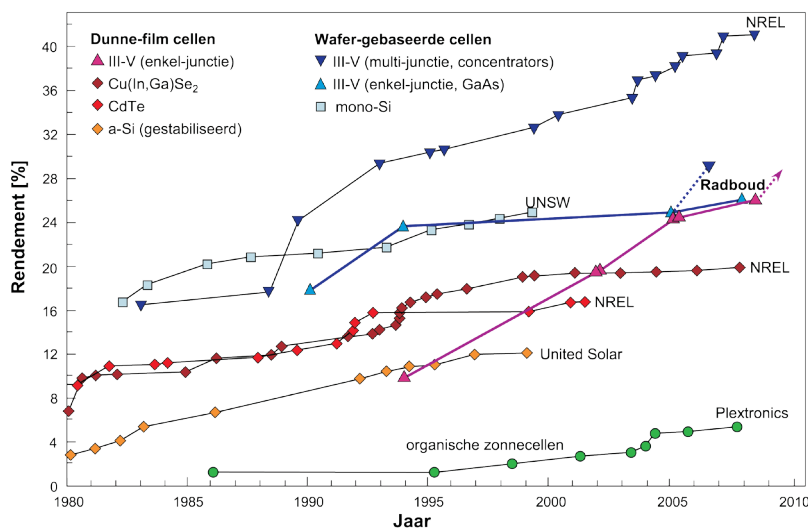
Meer dan 90% van alle commercieel geproduceerde zonnecellen is gebaseerd op het gebruik van c-Si plakken of wafers met een dikte van circa $250 \mu\text{m}$. Dit wijst erop dat vooralsnog met dit materiaalsysteem in een productieomgeving de beste prijs-prestatieverhouding wordt bereikt dat wil zeggen de laagste kosten per hoeveelheid gegenereerde elektrische energie. Kristallijn silicium heeft echter een funda-



Figuur 1 Een zonnecel bestaat uit een plak halfgeleidermateriaal met een p-n junctie waardoor een inwendig elektrisch veld (E) ontstaat. Door de absorptie van licht in de zonnecel worden elektronen losgeslagen uit hun vaste positie in het kristalrooster en ontstaan er vrije elektronen (negatief) en gaten (positief). De elektronen en gaten ondergaan een versnelling in het elektrische veld en bewegen daardoor elk naar een andere kant van de cel. Aan het uiteinde van de cel wordt de elektronenstroom afgevoerd via metaalcontacten (in een metaal vindt geen gatentransport plaats). Na het verrichten van nuttige arbeid in een uitwendig elektrisch circuit komen de elektronen terug aan de andere kant van de cel waar ze recombineren met de daar aanwezige gaten. De bovenkant van de cel is slechts gedeeltelijk gemetalliseerd (grid-contactpatroon) omdat het licht tussen de metaallijnen de cel moet kunnen binnendringen.

menteel nadeel voor de toepassing in zonnecellen, het is een zogenaamde indirecte halfgeleider. Dit houdt in dat er voor het exciteren van een elektron behalve een foton met voldoende energie gelijktijdig ook een fonon (gekwantiseerde kristalroostertrilling) nodig is voor de impulsoverdracht. De

kans op deze driedeeftjes interactie is relatief klein zodat er een vrij dikke laag hoogzuiver c-Si nodig is om al het bruikbare licht te absorberen (typisch $200 \mu\text{m}$ voor 95% absorptie). Dit gegeven staat haaks op het streven naar een minimaal gebruik van kostbaar halfgeleidermateriaal.



Figuur 2 Toename van het zonnecelrendement voor verschillende materialen zoals gemeten over een periode van 30 jaar bij het erkende testcentrum van het National Renewable Energy Laboratory (NREL) in de Verenigde Staten [2]. Bij elke lijn in de figuur is de naam van het instituut vermeld waar de cel met het hoogste rendement is geproduceerd. Voor de meeste materiaalsystemen vlak de rendementstoename af omdat deze hun theoretische maxima naderen. Alleen voor III-V cellen stijgt het rendement nog significant en is de 50% grens het volgende target. Ter vergelijking zijn ook de resultaten weergegeven zoals behaald aan de Radboud Universiteit Nijmegen (dikke blauwe en paarse lijnen) en bevestigd door metingen aan het erkende testcentrum van het Fraunhofer Instituut in Freiburg.

Dunne-film cellen

Voor de meeste directe halfgeleiders is een dunne-film van maximaal enkele micrometers dik voldoende om het bruikbare licht te absorberen. Het ligt dus voor de hand om deze materialen te gebruiken voor de productie van zonnecellen. De hiervoor meest toegepaste materialen zijn amorf silicium (a-Si), cadmium-telluride (CdTe) en samengestelde materialen op basis van de elementen koper, indium, gallium en seleen of in sommige gevallen zwavel. De laatste materiaalgroep wordt aangeduid met CIGS (CuInGaSe). Voor de verwerking tot zonnecellen worden de dunne-film materialen meestal gedeponerd op glasplaten (batch productie) of metaalfolies (roll-to-roll productie). Er is een grote range aan depositietechnieken beschikbaar, elk met specifieke voor- en nadelen ten aanzien van het te behalen rendement en de productiekosten.

Uit figuur 2 blijkt dat in het laboratorium met CIGS en CdTe rendementen van bijna 20% worden behaald. Een belangrijk fundamenteel nadeel van deze dunne-film cellen is echter dat het polykristallijne of amorf materiaal zijn. De korrelgrenzen tussen de kristallen en onverzadigde bindingen manifesteren zich als defecten. Elkaar

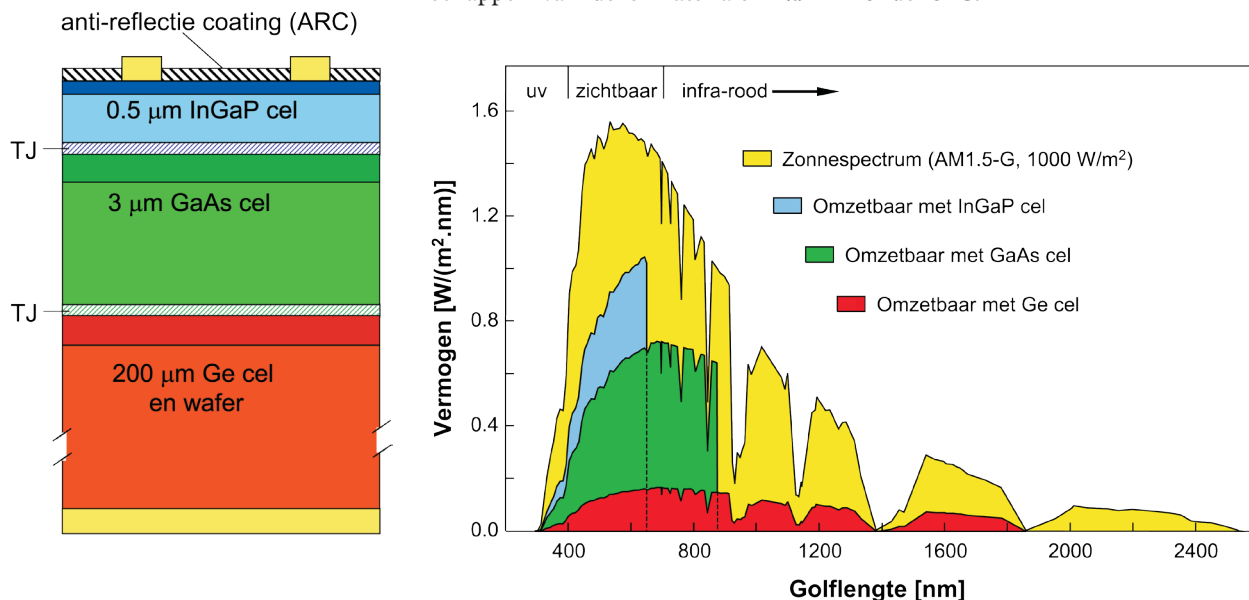
passerende vrije elektronen en gaten die eerder door absorptie van zonlicht zijn gegenereerd, worden door deze defecten afgeremd en recombineren daardoor sneller met elkaar. Deze interne recombinatie resulteert in lagere rendementen dan met c-Si wordt behaald. Op kleine schaal in het laboratorium zijn de defecten nog enigszins te omzeilen maar in groot-schalige productie blijkt dit een moeilijke opgave en blijft het rendement voorsnog steken op 5,5-6,5% voor a-Si, 7-9% voor CdTe en 10-11% voor CIGS [3].

III-V cellen

Vanuit fundamenteel oogpunt is voor een optimale zonnecel een directe halfgeleider met een perfecte kristalstructuur nodig. Aan deze beschrijving wordt voldaan door zogenaamde III-V halfgeleiders. Dit zijn materialen die bestaan uit een één-op-één combinatie van elementen uit groep III (aluminium, gallium en indium) en groep V (stikstof, arseen en fosfor) van het periodiek systeem. Op basis van deze elementen kan een grote variëteit aan materialen worden samengesteld, GaAs, InGaP, InGaAs etc., zolang hierin het aantal atomen van groep III maar gelijk is aan dat van groep V. De samenstelling en daarmee de eigenschappen van deze materialen kun-

nen worden afgestemd op de wens van de gebruiker. Het materiaal dat wat bandafstand betreft het beste past bij de energieverdeling van het zonnenspectrum is GaAs. Het is dus niet verwonderlijk dat in 2007 de zonnecelonderzoeksgroep van de Radboud Universiteit Nijmegen juist met dit materiaal een recordrendement van 26,1% heeft bereikt [1]. Dit is van alle materialen wereldwijd het hoogste rendement dat met een enkelvoudige zonnecel is bereikt, maar het kan nog beter.

III-V materialen zijn namelijk bijzonder geschikt om meervoudige (multi-junctie) zonnecellen van te maken. Dit is een stapeling van meerdere zonnecellen, elk met een andere bandafstand waardoor ze gevoelig zijn voor verschillende delen van het zonnenspectrum [4]. Per oppervlak kan zo een groter deel van het invallende zonlicht worden omgezet in elektrische energie (zie figuur 3). Op deze wijze is er door Spectrolab in de Verenigde Staten met een tripel-junctie cel het record van 32% voor een zonnecel onder STC gehaald [1]. Vanwege de extreem hoge kosten werden III-V zonnecellen in eerste instantie alleen in de ruimtevaart toegepast. De hiervoor geproduceerde cellen hebben typisch een rendement van 29-30% onder STC.

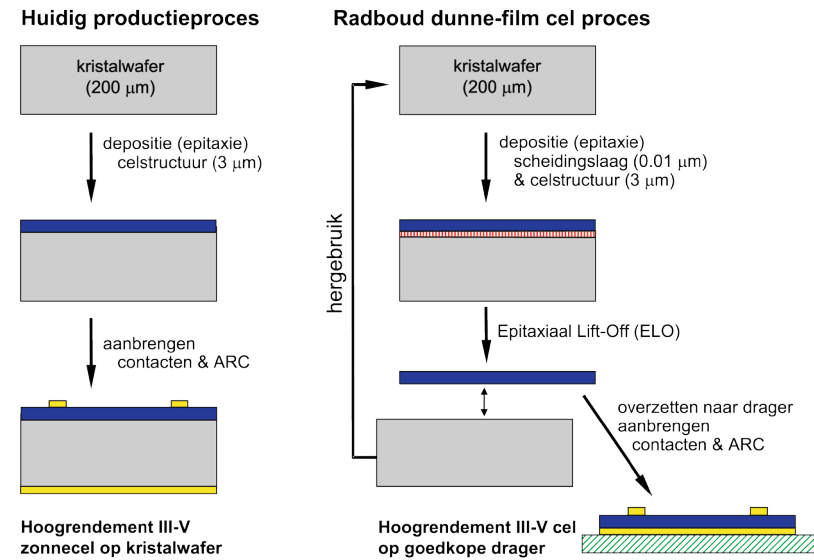


Figuur 3 Doorsnede (links) en het theoretische omzetrendement (rechts) van een tripel-junctie zonnecel. Speciale III-V tunnel-junctie-structuren (TJ) fungeren als transparante contacten tussen de cellagen. In de grafiek is de energieverdeling van het standaard zonnenspectrum weergegeven. Het gele oppervlak onder deze kromme is 1000 W/m². Het groene oppervlak geeft aan hoeveel hiervan theoretisch door een enkelvoudige GaAs cel kan worden omgezet in elektrische energie (28%). De blauwe en rode oppervlakken geven aan wat hieraan door de InGaP en Ge lagen van de tripel-junctie cel wordt toegevoegd voor een totaalrendement van 40% onder STC. De theoretische waarden zijn berekend op basis van het diodemodel [5]. Dit model geeft realistische limietwaarden voor het experimenteel haalbare rendement. Veel andere modellen negeren de verliesfactoren gerelateerd aan het diodegedrag van de zonnecel en komen hierdoor uit op significant hogere maar weinig realistische theoretische limieten voor de experimenteel haalbare rendementen.

Cellen onder concentratie

Door hun specifieke eigenschappen (multi-junctie, hoge warmtebestendigheid en hoge rendement) zijn III-V cellen bij uitstek geschikt voor toepassing onder geconcentreerd licht. Hierbij doet zich het bijzondere verschijnsel voor dat bij een toename van de lichtintensiteit de elektrische output van de cellen meer dan evenredig stijgt en dus het rendement toeneemt. Gebruikmakend van dit verschijnsel is door NREL het absoluut hoogste zonnecelrendement van dit moment bereikt, 40.8% met een InGaP/GaAs/InGaAs zonnecel bij een concentratiefactor van 140 dat wil zeggen een instraling van 140 maal de standaard intensiteit [1]. In de Solar Cell Efficiency Tables vormen de metingen onder geconcentreerd licht een aparte categorie.

Het concentratieprincipe is niet alleen wetenschappelijk interessant maar wordt ook in praktijk toegepast [4,6]. In concentratorsystemen wordt over een groot oppervlak licht ingevangen op lenzen en/of spiegels en gefocuseerd op een klein oppervlak aan hoogrendement zonnecellen. Op deze wijze worden in feite zonnecellen op basis van kostbaar hoogzuiver halfgeleidermateriaal vervangen door goedkope spiegels en lenzen van metaal of kunststof. De potentiële besparing neemt toe met de concentratiefactor. Voor de meest gangbare systemen wordt op dit moment een concentratiefactor 500 toegepast. Deze concentrators zijn roteerbaar opgesteld en worden via een trackingsysteem continue op de zon gericht [6]. Dit brengt significante systeemkosten met zich mee waardoor concentrators 10 jaar geleden alleen rendabel waren in woestijngebieden rond de evenaar met extreem veel directe zoninstraling. Echter, de elektrische output van de systemen neemt evenredig toe met de snel stijgende rendementen van de hierin geïntegreerde III-V cellen (drie-junctie cellen met 36% rendement bij een concentratiefactor 500 zijn reeds commercieel verkrijgbaar) terwijl de productiekosten nagenoeg gelijk blijven. Als gevolg hiervan wordt het toepassingsgebied steeds groter. Zo zijn er in Spanje en Italië al velden met concentratorsystemen en staan er test- en demonstratieopstellingen in Zuid-Duitsland [6] en België [4]. Bij voldoende toename van het celrende-



Figuur 4 Het huidige productieproces (links) waarbij III-V zonnecelstructuren, inclusief de germanium wafers waarop deze zijn gegroeid, worden verwerkt tot zonnecellen. Bij de nieuw ontwikkelde ELO methode wordt voor de depositie van de zonnecel eerst een etsgevoelige scheidelingslaag aangebracht. Op deze wijze kan de zonnecel na depositie met een etsmiddel worden gescheiden van de wafer en worden overgezet op een goedkope glazen of kunststof drager. De III-V film op zijn nieuwe drager wordt verder verwerkt tot een daadwerkelijke dunne-film zonnecel, terwijl de kostbare kristalwafer kan worden hergebruikt voor de groei van de volgende celstructuur.

ment of een significante kostenreductie (zoals beoogd met het hieronder beschreven epitaxiaal lift-off proces) kan ook Nederland binnen het toepassingsgebied komen te liggen.

Dunne-film III-V cellen

Voor een perfecte kristalstructuur worden III-V zonnecelstructuren met een dikte van slechts enkele micrometers epitaxiaal (d.w.z. met een doorlopend kristalrooster) afgezet op germanium kristalwafers [4]. Na depositie van de III-V structuur heeft de wafer geen toegevoegde waarde voor het functioneren van de zonnecel maar wordt samen met de III-V film verwerkt tot een zonnecel (zie figuur 4). Om deze reden wordt de huidige generatie III-V cellen net als c-Si gerekend tot de wafer gebaseerde cellen. Aan de Radboud Universiteit is een epitaxiaal lift-off (ELO) methode ontwikkeld [7] waarmee de kostbare germanium wafers kunnen worden hergebruikt en een echte dunne film III-V zonnecel op een goedkope drager wordt verkregen (zie figuur 4). Aanvankelijk hadden de dunne-film GaAs cellen een rendement van slechts 10% maar inmiddels is dit opgevoerd tot 26.1% (zie figuur 2). Dit is een record voor enkelvoudige dunne-film cellen en een evenaring van het recordrendement voor een reguliere GaAs cel op een wafer waaruit blijkt dat het ELO

proces geen schade toebrengt aan de celstructuur. In Nijmegen wordt nu gewerkt aan de volgende stappen van het onderzoek: de ontwikkeling van dunne-film multi-junctie cellen en het gebruik hiervan onder geconcentreerd licht. In dit kader is er nu op een wafer een dubbel-junctie cel gerealiseerd met een rendement van bijna 30% onder standaard condities (zie ook figuur 2) en is er een meetmethode ontwikkeld om tot een concentratiefactor van 750 maal nauwkeurige metingen te verrichten. De goede resultaten met twee recordvermeldingen in de meest recente editie van de Solar Cell Efficiency Tables [1] hebben in binnen- en buitenland tevens de aandacht getrokken van bedrijven die in samenwerking met de Radboud Universiteit specifieke III-V cellen voor concentrator- en ruimtevaarttoepassingen willen ontwikkelen.

Referenties

- 1 M.A. Green et al., *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **17**, 85 (2009).
- 2 Figuur bewerkt uit: S. Kurtz, *Photovolt. Int.* **1**, 121 (2008).
- 3 S. Hegedus, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **14**, 393 (2006).
- 4 W. Geens, *NTvN* **72**, 340 (2006).
- 5 M.A. Green, *Solar Cells*, Prentice Hall, New York (1982).
- 6 A.W. Bett et al., *Proc. 33rd IEEE Photovolt. Specialist Conf.*, San Diego, USA (2008).
- 7 J.J. Schermer et al., *Thin Solid Films* **511-512**, 645 (2006).